

Etude expérimentale et numérique de l'initiation du délaminage de bord libre dans les structures composites stratifiées

Y.Duplessis Kergomard^a, C.Landry^b, J.Renard^a, A.Thionnet^a

^aCentre des Matériaux P.M Fourt - UMR CNRS 7633 - BP87 91003 EVRY Cedex

^bCETIM de Nantes, 74 route de la Jonelière BP82617 44236 NANTES Cedex 3

RESUME

L'étude se décompose en trois étapes. Premièrement, une campagne d'essais a été menée, au cours de laquelle une méthode d'observation optique innovante a été établie afin de détecter des endommagements. Cette méthode a été utilisée avec succès pour suivre l'évolution de ces endommagements sur de nombreuses séquences. Deuxièmement, un critère quadratique non local d'initiation du délaminage a été établi. Le critère permet de prendre en compte un effet de retard de l'initiation du délaminage lorsque l'interface est en compression. Par ailleurs, les chutes de rigidités des plis dues à l'évolution de la fissuration intralaminare ont été prises en compte avec l'utilisation d'un modèle élastique endommageable. Enfin troisièmement, le critère a été identifié à partir des essais réalisés sur des éprouvettes non trouées. Puis, les prédictions du critère ont été comparées avec les résultats expérimentaux provenant d'essais réalisés sur des éprouvettes non trouées de séquences différentes et sur des spécimens troués.

MOTS-CLES : composites, délaminage, initiation, critère, détection.

INTRODUCTION

Les composites à matrice organique renforcée par des fibres longues sont des matériaux de plus en plus utilisés dans de nombreux domaines (aéronautique, automobile, industrie pétrolière...). Ces composites sont sujets à différents endommagements dont le délaminage et la fissuration intralaminare. L'objectif de cette étude est de proposer un critère d'initiation du délaminage. L'étude se décompose en trois étapes. Premièrement, une campagne d'essais a été menée, au cours de laquelle une méthode d'observation innovante a été établie afin de détecter des endommagements pour un matériau semi-transparent de type verre / époxy. Les observations se font sur la tranche des éprouvettes ou sur le bord du trou. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un colorant pénétrant et d'une source lumineuse qui diffuse de la lumière à travers le matériau : la surface observée est éclairée par l'arrière, révélant très nettement le colorant ayant pénétré dans les fissures débouchantes. Cette méthode a été utilisée avec succès pour suivre l'évolution de ces endommagements sur de nombreuses séquences. Deuxièmement, un critère quadratique d'initiation du délaminage a été établi. Le critère est construit à partir des composantes antiplanes du tenseur des contraintes. Chacune de ces composantes est au préalable moyennée sur une distance caractéristique, propre aux interfaces. De plus, le critère permet de prendre en compte un effet de retard de l'initiation du délaminage lorsque l'interface est en compression. Par ailleurs, les chutes de rigidités des plis dues à l'évolution de la fissuration intralaminare ont été prises en compte avec l'utilisation d'un modèle élastique endommageable. Enfin troisièmement, le critère a été identifié à partir des essais réalisés sur des éprouvettes non trouées. Puis, les prédictions du critère ont été comparées avec les résultats expérimentaux provenant d'essais réalisés sur des éprouvettes non trouées de séquences différentes et sur des spécimens troués.

1 MODELISATION

Le délaminage de bord libre apparaît à l'intersection de l'interface entre deux plis et du bord libre. Afin de comprendre les mécanismes d'initiation du délaminage, les contraintes ont été analysées le long de l'interface dans la direction perpendiculaire au plan tangent du bord libre. Les analyses ont été faites à l'échelle du pli, dite échelle mésoscopique. Les plis sont considérés comme étant homogènes avec un comportement élastique endommageable. Enfin, les bords libres sont supposés plans. Dans le repère de référence, l'axe x est parallèle à la direction de traction, l'axe y est parallèle à la direction transverse du composite et enfin, l'axe z est parallèle à l'épaisseur du stratifié. Dans le but d'étudier l'initiation du délaminage, plusieurs auteurs [1-6] ont choisi un critère quadratique en contraintes, non local. Ainsi, Marion et al. [2] ont proposé le critère suivant :

$$\left(\frac{\bar{\sigma}_{xz}}{\sigma_{xz}^D}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\sigma}_{yz}}{\sigma_{yz}^D}\right)^2 + \left(\frac{\bar{\sigma}_{zz}}{\sigma_{zz}^{DT}}\right)^2 = 1$$

où σ_{zz}^D , σ_{yz}^D et σ_{xz}^D sont respectivement la résistance de l'interface à la rupture en mode I (en traction), mode II et mode III. Avant de calculer le critère, les contraintes sont moyennées suivant deux longueurs caractéristiques du matériau, nommées y_{0zz} et y_{0xz} . Les contraintes moyennes sont calculées comme suit :

$$\bar{\sigma}_{xz} = \frac{1}{y_{0xz}} \int_0^{y_{0xz}} \sigma_{xz} dy, \quad \bar{\sigma}_{yz} = \frac{1}{y_{0xz}} \int_0^{y_{0xz}} \sigma_{yz} dy, \quad \bar{\sigma}_{zz} = \frac{1}{y_{0zz}} \int_0^{y_{0zz}} \sigma_{zz} dy$$

Lorsque la moyenne de la composante σ_{zz} du tenseur des contraintes est positive, l'interface est dite "solicitée en traction"; lorsque la moyenne est négative, l'interface est dite "solicitée en compression".

Une compression de l'interface amène des traitements différents suivants les auteurs. Le critère précédent permet à l'aide du terme linéaire $\bar{\sigma}_{zz}$ de simuler un retardement du délaminage par une contrainte interlaminaire de compression. Par la suite, ce phénomène sera nommé "effet retard du délaminage". Le coefficient utilisé pour cet effet retard est identique au coefficient de la résistance à la rupture en traction de l'interface. C'est une hypothèse forte qui ne peut pas rendre compte de la réalité. Dans cette étude, l'effet retard est pris en compte en faisant une analogie avec la loi de Coulomb : il est supposé que plus l'interface est en compression, plus l'initiation du délaminage par cisaillement de l'interface délaminante sera retardée. Une condition est alors posée pour que le délaminage par cisaillement de l'interface puisse débuter :

$$\sqrt{\bar{\sigma}_{xz}^2 + \bar{\sigma}_{yz}^2} + h(\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-) > 0$$

où $h(\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-)$ est une fonction négative caractéristique permettant de prendre en compte l'effet retard; $\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-$ est la moyenne de la partie négative de σ_{zz} ; pour simplifier le problème, $h(\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-)$ est choisi comme étant linéaire : $h(\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-) = k \times \langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-$, où k est une constante matériau.

Par ailleurs, il est raisonnable de supposer $\sigma_{xz}^D = \sigma_{yz}^D$ dans le cas de l'initiation du délaminage; ainsi, une sollicitation de l'interface en mode II ou III ne sera pas différenciée; ces deux modes de sollicitation seront nommés sous une appellation plus générale : sollicitation de l'interface en mode de cisaillement. Ainsi, le critère est de la forme :

$$\left(\frac{\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^+}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\langle \sqrt{\bar{\sigma}_{yz}^2 + \bar{\sigma}_{xz}^2} + h(\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^-) \rangle^+}{S}\right)^2 = 1$$

où, $\langle x \rangle^+ = x$ si $x > 0$, 0 sinon; $\langle x \rangle^- = x$ si $x < 0$, 0 sinon; Y_t est la résistance à la traction de l'interface; S est la résistance au cisaillement de l'interface.

Les moyennes sont pour calculées sur une seule longueur caractéristique de l'interface, nommée l_0 :

$$\bar{\sigma}_{xz} = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \sigma_{xz} dy, \quad \bar{\sigma}_{yz} = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \sigma_{yz} dy, \quad \langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^+ = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \langle \sigma_{zz} \rangle^+ dy, \quad \langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^- = \frac{1}{l_0} \int_0^{l_0} \langle \sigma_{zz} \rangle^- dy$$

L'utilisation d'une deuxième longueur caractéristique pour ce matériau n'a pour l'instant pas été justifiée. Cette longueur est une ligne contenue dans le plan de l'interface et perpendiculaire au plan tangent du bord libre, où le délaminage doit débuter.

Par ailleurs, le critère calculé dans différents repères dont les axes z sont normaux à l'interfaces donnent des résultats identiques. C'est pourquoi, le critère a par la suite toujours été calculé dans le repère de référence (xyz) .

Pour identifier les coefficients du critère, certains auteurs [1-5] scindent l'identification en deux parties : tout d'abord ils recherchent des empilements dont le délaminage apparaît sur des interfaces sollicitées en mode III quasiment pur pour identifier les coefficients du critère liés à ce mode d'initiation du délaminage ; puis ils recherchent des empilements dont le délaminage apparaît sur des interfaces sollicitées en mode I pour identifier les autres coefficients. Toutefois, il est très difficile de trouver une séquence dont le délaminage apparaît sur des interfaces sollicitées en mode I pur ; les auteurs se reportent donc par défaut sur une sollicitation en mode mixte (traction et cisaillement) de l'interface délaminante. La méthode d'identification utilisée dans cette étude est inspirée de celle initiée par Lecuyer [3] et améliorée par Marion [2]. Celle-ci se base sur "l'effet d'épaisseur" observée expérimentalement : pour un empilement donné, plus les couches sont épaisses, plus le stratifié est susceptible de délaminer. Il ne faut pas voir ce phénomène comme un effet de volume : les caractéristiques des interfaces sont en effet considérées comme indépendantes de l'épaisseur ; en revanche, l'épaisseur agit sur l'état de contrainte au bord des stratifiés et par conséquent sur le chargement de ces stratifiés au moment de l'initiation du délaminage. Ainsi, dans cette étude, les séquences qui ont été utilisées pour identifier le critère sont les séquences $(0_n^\circ, \pm 20_n^\circ)_s$, $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)_s$ ($n = 1, 2, 3$) et $(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$. Les séquences $(0_n^\circ, \pm 20_n^\circ)_s$ délaminent aux interfaces $20^\circ / -20^\circ$ sollicitées en mode III quasiment pur. Aucune fissure intralaminaires n'a été observée avant l'apparition du délaminage. Les séquences $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)_s$ délaminent aux interfaces $-45^\circ / 90^\circ$ sollicitées en mode mixte (traction et cisaillement de l'interface). Toutefois, de la fissuration intralaminaires se développe dans les plis orientés à 90° bien avant le début du délaminage. Enfin, la séquence $(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$ a été dimensionnée pour l'identification du coefficient k : les interfaces $30^\circ / -30^\circ$ délaminent par cisaillement avec une composante de compression non négligeable $(\langle \bar{\sigma}_{zz} \rangle^- = -32 MPa)$, calculé sur une longueur $l_0 = 11 \mu m$. La fissuration intralaminaires se développe également dans les plis à 90° .

En modifiant la rigidité des plis, les fissures intralaminares modifient l'état de contrainte aux interfaces. Pour prendre en compte ce phénomène, un modèle de comportement élastique endommageable à préalablement été écrit. Ce modèle décrit les pertes de rigidités des plis avec l'évolution de la fissuration intralaminaires dans les plis les plus désorientés. Ce modèle est présenté dans les références [7,8]. Il est basé sur l'écriture d'un potentiel thermodynamique, dont la forme générale est la suivante :

$$\Psi(\xi, \alpha, m, r) = \frac{1}{2} \cdot \xi : \left(\tilde{C}^0 - \tilde{C}^{end}(\alpha, m, r) \right) : \xi$$

où \tilde{C}^0 est le tenseur de rigidité du pli non endommagé ; \tilde{C}^{end} est le tenseur qui décrit les chutes de rigidités du pli liées aux endommagements intralaminares ; ce tenseur rend compte de l'anisotropie mécanique induite par les endommagements et son caractère unilatérale ; il a été identifié par des moyens numériques et expérimentaux ; α , m et r sont des variables internes ; α est la variable quantifiant les endommagements (pour le matériau étudié, α est égale à la densité de fissures du pli) ; m est le mode de sollicitation des fissures (traction / compression ou cisaillement), supposées toutes parallèles aux fibres ; r est l'amplitude d'ouverture des fissures ; lorsque le chargement de l'éprouvette referme les fissures, les propriétés mécaniques du matériau sont restaurées, exceptées les propriétés associées au cisaillement.

Le critère identifié, ses prédictions ont été confrontées à des essais réalisés sur d'autres empilements et sur des éprouvettes trouées. Les éprouvettes de traction non trouées ont été testées avec les autres séquences : $(0_2^\circ, \pm 30_2^\circ)_s$, $(10_2^\circ, 30_2^\circ, -10_2^\circ)_s$, $(10_2^\circ, 40_2^\circ, -20_2^\circ)_s$ et $(10_2^\circ, 55_2^\circ, -35_2^\circ, 100_2^\circ)_s$. Deux séquences ont été modélisées et testées avec des éprouvettes trouées : les séquences $(0_2^\circ, \pm 20_2^\circ)$ et $(0_2^\circ, \pm 45_2^\circ, 90_2^\circ)$. Le repère dans lequel est calculé le critère pour les éprouvettes trouées est identique à celui des éprouvettes non trouées.

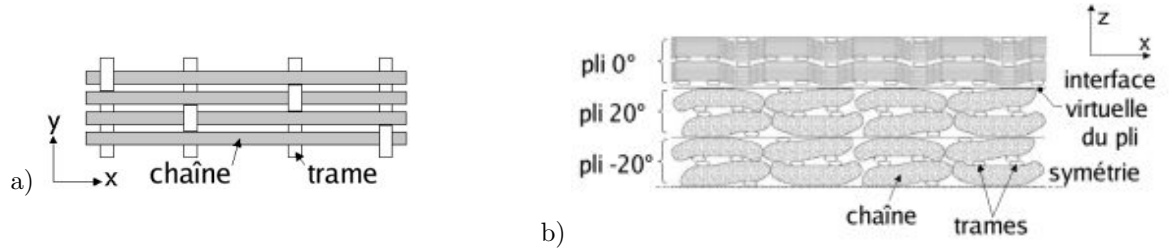
2 EXPERIMENTATION

2.1 Présentation du matériau de l'étude

Le matériau étudié dans cette études est un composite stratifié en verre / époxy. Les stratifiés ont été mis en oeuvre par autoclave en utilisant des préimprégnés comme pli de base. Ces préimprégnés sont des tissus satin 4 (figure 1) composés de 87% de fibres dans la direction chaîne et de 13% dans la direction trame. Le volume nominal de fibre est de 53%. L'épaisseur théorique du pli de base polymérisé est de $0,216 mm$. Enfin, le comportement élastique du pli de base est orthotrope. Sur les 9 coefficients ingénieurs, 4 ont été identifiés

TAB. 1 – Coefficients ingénieurs du comportement élastique orthotrope du pli de base

E_{11}	E_{22}	E_{33}	G_{12}	G_{13}	G_{23}	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
40GPa	19GPa	10GPa	6,6GPa	6,1GPa	3,7GPa	0,21	0,19	0,35

FIG. 1 – a) Schéma d'un tissu satin 4 observée suivant la direction z ; b) Schéma d'un demi-stratifié de séquence $(0_2^\circ, 20_2^\circ, -20_2^\circ)_s$ observée suivant la direction y

à l'aide d'essais de traction sur des unidirectionnels (E_{11} , E_{22} , G_{12} et ν_{12}). Les autres coefficients ont été pris dans la littérature ou évalués par calculs. Les valeurs des coefficients sont données dans la table 1.

2.2 Mise au point de méthodes d'observation du délaminage de bord libre

Une méthode expérimentale originale a été mise au point pour observer des fissures débouchantes sur les bords libres. Cette méthode a été utilisée pour observer les endommagements sur la tranche des éprouvettes et sur le bord libre des trous (dans le cas d'une éprouvette trouée). Tout d'abord, les surfaces à observer sont polies avant de débiter les essais. Chaque éprouvette est mise successivement en traction jusqu'à différents paliers de contraintes. Entre chaque montée en charge, l'éprouvette est démontée pour être analysée. Un pénétrant colorée (utilisé pour le ressuage) est appliquée sur la surface à observer, préalablement nettoyée, et va pénétrer par capillarité dans les défauts débouchants. Après un temps d'imprégnation de 15 à 20 mn à température ambiante, l'excès de pénétrant est éliminé par lavage. Les propriétés de transparence du matériau sont ensuite mises à profit : un éclairage est placé sur le côté de l'éprouvette de telle manière que la lumière se diffuse à travers le matériau et vienne éclairer l'arrière de la surface à observer. Ce type d'éclairage masque partiellement la microstructure et les défauts de polissage tout en faisant très nettement ressortir le colorant contenu dans les endommagements débouchants. Les images sont obtenues à l'aide d'une caméra optique montée sur un trépied et d'un système optique grossissant (figure 2). Après la détection du délaminage, l'ajout d'une lumière frontale, envoyée directement depuis la caméra, permet de faire ressortir la microstructure. Pour observer les endommagements sur les éprouvettes trouées, un miroir orienté à 45° par rapport à l'axe du trou a été ajouté. Il permet l'observation du bord du trou avec la même méthode et la même caméra que précédemment (figure 2). Ainsi des observations provenant d'éprouvettes de traction non trouées et trouées peuvent aisément être comparées.

Une méthode pour observer le délaminage en profondeur du matériau a également été mise au point. Dans ce but, des éprouvettes ont été chargées en traction jusqu'à la détection de l'initiation du délaminage. Puis, après avoir soigneusement repéré un délaminage sur la tranche de chaque éprouvette, ces dernières ont été découpées suivant leur section. Les observations se font au microscope optique suivant l'axe des x du repère de référence (figure 6). Ici encore, les éprouvettes ont été éclairées de côté pour faire ressortir sur les images le colorant contenu dans les endommagements débouchants. En outre, un polissage a été effectué entre chaque observation afin d'éliminer de la matière (tout en permettant de rendre les images lisibles). Ainsi, des essais préalables ont montré qu'un polissage de 30 s au grain 1200 élimine entre 30 à $100\mu\text{m}$ de matière (environ).

2.3 Description des essais de tractions

Des essais de traction ont été réalisés sur des éprouvettes planes non trouées et des éprouvettes planes trouées. Chaque essai de traction a été segmenté en palier de contraintes afin d'effectuer des observations tous les 25MPa pour les éprouvettes non trouées et tous les 15MPa pour les éprouvettes trouées. Pour les éprouvettes

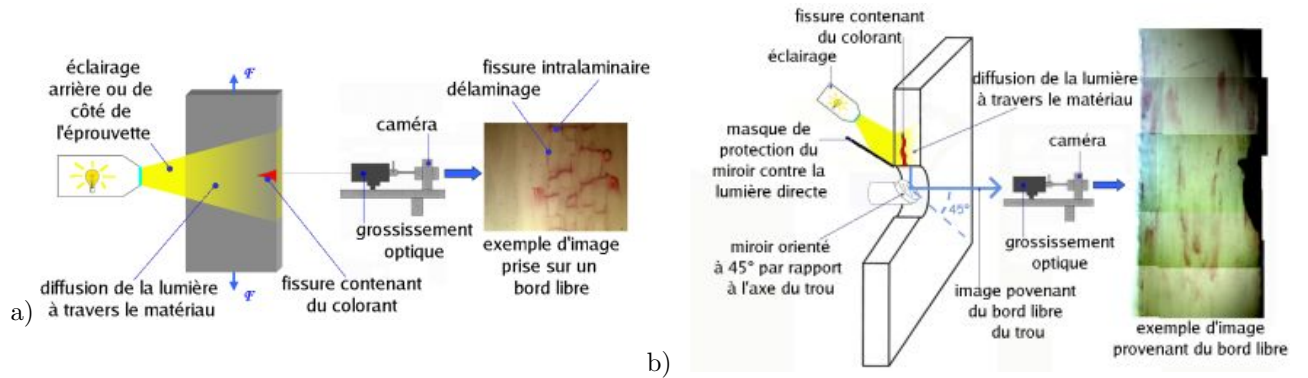


FIG. 2 – a) Les endommagements sont détectés sur les bords libres d’une éprouvette à l’aide d’un colorant pénétrant, d’un éclairage sur le côté de l’éprouvette et d’une caméra optique; b) pour détecter des endommagements sur le bord libre d’un trou, un miroir supplémentaire est utilisé

non trouées, les séquences utilisées sont : $(0_n^\circ, \pm 20_n^\circ)_s$, $(0_2^\circ, \pm 30_2^\circ)_s$, $(10_2^\circ, 30_2^\circ, -10_2^\circ)_s$, $(10_2^\circ, 40_2^\circ, -20_2^\circ)_s$, $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)_s$ et $(10_2^\circ, 55_2^\circ, -35_2^\circ, 100_2^\circ)_s$ ($n = 1, 2, 3$); pour les éprouvettes trouées, les séquences utilisées sont : $(0_2^\circ, \pm 20_2^\circ)_s$ et $(0_2^\circ, \pm 45_2^\circ, 90_2^\circ)_s$. Les dimensions des éprouvettes non trouées sont de $25 \times 200\text{mm}$. Les éprouvettes trouées ont des dimensions de $60 \times 400\text{mm}$, avec un trou central de 20mm .

3 RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 Eprouvettes non trouées

Le tableau 2 présente les résultats expérimentaux obtenus sur les éprouvettes non trouées. Pour les séquences $(0_n^\circ, \pm 20_n^\circ)_s$ ($n = 1, 2, 3$) et $(0_2^\circ, \pm 30_2^\circ)_s$, le délaminage apparaît aux interfaces $20^\circ / -20^\circ$ et $30^\circ / -30^\circ$ respectivement. Pour les séquences $(10_2^\circ, 30_2^\circ, -10_2^\circ)_s$ et $(10_2^\circ, 40_2^\circ, -20_2^\circ)_s$, le délaminage apparaît aux interfaces $10^\circ / 30^\circ$ et $30^\circ / -10^\circ$ pour la première séquence, $10^\circ / 40^\circ$ et $40^\circ / -20^\circ$ pour la seconde séquence. Sur ces séquences, aucune fissuration intralaminare n’a été observée avant l’apparition du délaminage. Des calculs par éléments finis ont été effectués sur ces séquences avec un comportement élastique non endommageable. Ces calculs montrent que ces interfaces délaminantes sont majoritairement sollicités en cisaillement. Toutefois les contraintes calculées le long de l’interface $10^\circ / 30^\circ$ (resp. $10^\circ / 40^\circ$) sont très inférieures à celles calculées le long de l’interface $30^\circ / -10^\circ$ (resp. $40^\circ / -20^\circ$). Le délaminage ne devrait donc pas apparaître aux interfaces $10^\circ / 30^\circ$ et $10^\circ / 40^\circ$ pour ces niveaux de charges. Pour confirmer que le délaminage est bien apparu à ces interfaces, une éprouvette $(10_2^\circ, 30_2^\circ, -10_2^\circ)_s$ a été découpée suivant sa section, puis des observations ont été faites au microscope optique, dans la direction de l’axe x du repère de référence. La figure 3 confirme que le délaminage s’est bien développé à l’interface $10^\circ / 30^\circ$. Des observations plus approfondies sur ces deux séquences laissent supposées que ce phénomène est dû à l’ondulation des chaînes dans le tissu du pli de base. Pour les séquences $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)_s$ ($n = 1, 2, 3$) et $(10_2^\circ, 55_2^\circ, -35_2^\circ, 100_2^\circ)_s$, de la fissuration intralaminare a été observée dans les plis à 90° , 55° et 100° . Pour la première séquence, le délaminage apparaît aux interfaces $-45^\circ / 90^\circ$. Le plus souvent, ce dernier démarre en pointe d’une fissure intralaminare du pli à 90° . Dans de nombreux cas, ces délaminages semblent être une bifurcation des fissures intralaminaires suivant les plans des interfaces délaminantes. Pour la deuxième séquence, le délaminage apparaît également en pointes de fissures intralaminaires aux niveaux des interfaces $10^\circ / 55^\circ$, $55^\circ / -35^\circ$ et $-35^\circ / 100^\circ$ (également aux interfaces $55^\circ / -35^\circ$, mais pour des niveaux de charges un peu plus élevés). Par ailleurs, les trames présentes dans plis semblent interagir avec les fissures intralaminaires dans les plis 90° , 55° et 100° . Ces interactions provoquent l’apparition de fissures interlaminaires et intralaminaires longitudinales (figure 4). Très souvent, les endommagements intralaminaires longitudinaux observés sont d’ailleurs des délaminations locales entre une chaîne et une trame appartenant au même pli. Les calculs ont été réalisés avec le modèle de comportement élastique couplé à l’endommagement. Ils montrent que les interfaces délaminantes sont sollicitées en mode mixte (cisaillement et traction). Mais encore une fois, les contraintes calculées le long des interfaces $10^\circ / 55^\circ$ sont bien inférieures à celles calculées le long de l’interface $-35^\circ / 100^\circ$. Toutefois, dans le pli à 55° , les fissures intralaminaires ne sont pas perpendiculaires aux plans des plis (contrairement à celles du pli à 100°). Elles font un angle d’environ 30° avec les plans des plis à 55° . Puisque ces délaminages semblent résulter

TAB. 2 – Bilan des résultats obtenus sur des éprouvettes non trouées pour la détection de l'initiation du délaminage

Séquences	Interfaces	Σ_{macro} pour 3 essais (en MPa)			fissuration intralaminaires
$(0_1^\circ, \pm 20_1^\circ)_s$	$20^\circ / - 20^\circ$	325	350	350	
$(0_2^\circ, \pm 20_2^\circ)_s$	$20^\circ / - 20^\circ$	325	325	325	
$(0_3^\circ, \pm 20_3^\circ)_s$	$20^\circ / - 20^\circ$	250	300	275	
$(0_2^\circ, \pm 30_2^\circ)_s$	$30^\circ / - 30^\circ$	275	275	287.5	
$(10_2^\circ, 30_2^\circ, -10_2^\circ)_s$	$10^\circ / 30^\circ$	300	325	325	
	$30^\circ / - 10^\circ$	350	325	325	
$(10_2^\circ, 40_2^\circ, -20_2^\circ)_s$	$10^\circ / 40^\circ$	287.5	275	275	
	$40^\circ / - 20^\circ$	300	325	300	
$(0_1^\circ, \pm 45_1^\circ, 90_1^\circ)_s$	$-45^\circ / 90^\circ$	237.5	225	250	dans le pli à 90°
$(0_2^\circ, \pm 45_2^\circ, 90_2^\circ)_s$	$-45^\circ / 90^\circ$	225	250	250	dans le pli à 90°
$(0_3^\circ, \pm 45_3^\circ, 90_3^\circ)_s$	$-45^\circ / 90^\circ$	250	237.5	225	dans le pli à 90°
$(10_2^\circ, 55_2^\circ, -35_2^\circ, 100_2^\circ)_s$	$10^\circ / 55^\circ$	250	225	225	dans les plis à 55° et 100°
	$55^\circ / - 35^\circ$	250	262.5	262.5	
	$-35^\circ / 100^\circ$	250	237.5	225	
$(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$	$30^\circ / - 30^\circ$	300	300	275	dans le pli à 90°

TAB. 3 – Coefficients du critère d'initiation du délaminage identifiés

Y_t	S	l_0	k
25MPa	139MPa	0.011mm	0.16

d'une bifurcation des fissures intralaminaires, il est facile de comprendre que l'apparition du délaminage sera potentiellement plus aisé aux interfaces 55° qu'aux interfaces 100° . Ce phénomène n'a pas été pris en compte dans la modélisation, ce qui peut expliquer les écarts observés entre les simulations et les résultats expérimentaux.

Enfin, pour la séquence $(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$, le délaminage apparaît aux interfaces $30^\circ / - 30^\circ$. De la fissuration intralaminaires se développe dans les plis à 90° , mais ne semble pas interagir directement avec l'apparition du délaminage.

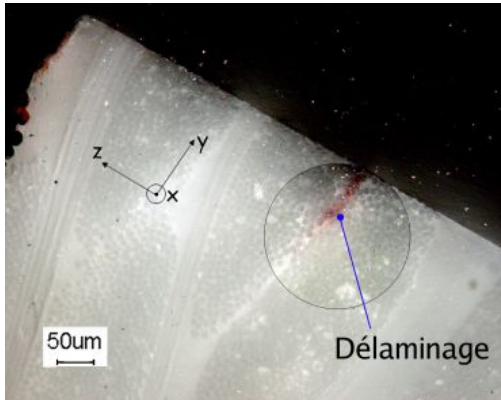
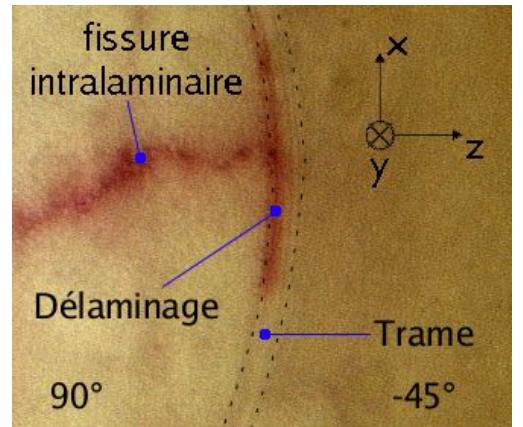
Il faut noter que les effets d'épaisseurs pour l'initiation du délaminage, constatés et habituellement étudiés sur des composites en carbone / époxy, ne semblent pas très prononcés sur le matériau de l'étude. En effet, ce phénomène est assez faible sur la famille de séquences $(0_n^\circ, \pm 20_n^\circ)$ ($n = 1, 2, 3$), et quasiment inexistant sur la famille $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)$ ($n = 1, 2, 3$). Ce constat peut poser problème pour l'identification des coefficients liés au mode d'initiation du délaminage en traction de l'interface. Il a donc été décidé d'identifier tout d'abord les coefficients S , l_0 et k à partir des séquences $(0_n^\circ, \pm 20_n^\circ)$ ($n = 1, 2, 3$) et $(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$, puis d'identifier Y_t à partir des séquences $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)$ ($n = 1, 2, 3$).

Le tableau 3 donne les résultats de l'identification et le tableau 4 donne les contraintes de chargement prédites par le critère au moment de l'initiation du délaminage aux niveaux de quelques interfaces. Le critère prédit très bien les différentes charges macroscopiques auxquelles s'initie le délaminage pour les séquences où il n'y a pas de fissuration intralaminaires. Même pour la séquence $(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$ où la fissuration intralaminaires se développe dans des plis éloignés des interfaces délaminantes, le critère donne des prédictions tout à fait correctes. Pour la famille $(0_n^\circ, \pm 45_n^\circ, 90_n^\circ)_s$ pour laquelle de la fissuration intralaminaires se développe dans les plis à 90° et interagit avec le délaminage, les prédictions du critère restent encore raisonnables. En revanche, pour la séquence $(10_2^\circ, 55_2^\circ, -35_2^\circ, 100_2^\circ)_s$, le critère sous-estime la charge macroscopique, ce qui peut s'expliquer par les nombreuses interactions entre les différents endommagements qui apparaissent.

Enfin, des éprouvettes de séquence $(0_1^\circ, \pm 20_1^\circ)_s$ et $(0_3^\circ, \pm 20_3^\circ)_s$ ont été découpées suivant leur section afin d'observer le délaminage en profondeur du matériau. Les observations se sont faites au microscope optique suivant la direction de l'axe x . Un exemple de photo de délaminage pris au grossissement $\times 100$ est présenté sur la figure 6. Cette photo a été prise sur une séquence $(0_3^\circ, \pm 20_3^\circ)_s$. Pour toutes les sections observées, seules les décohésions de quelques fibres ont été observées (1 à 3 fibres la plupart du temps). Ces décohésions ont débuté au niveau du bord libre et se sont propagées le long des fibres sur quelques dizaines ou centaines de μm .

TAB. 4 – Bilan des prédictions de l'initiation du délaminage sur des éprouvettes non trouées

Séquences	Interfaces	Σ_{macro} prédite (en MPa)
$(0_1^\circ, \pm 20_1^\circ)_s$	$20^\circ / -20^\circ$	340
$(0_2^\circ, \pm 20_2^\circ)_s$	$20^\circ / -20^\circ$	298
$(0_3^\circ, \pm 20_3^\circ)_s$	$20^\circ / -20^\circ$	275
$(0_2^\circ, \pm 30_2^\circ)_s$	$30^\circ / -30^\circ$	288
$(10_2^\circ, 30_2^\circ, -10_2^\circ)_s$	$10^\circ / 30^\circ$	/
	$30^\circ / -10^\circ$	347
$(10_2^\circ, 40_2^\circ, -20_2^\circ)_s$	$10^\circ / 40^\circ$	/
	$40^\circ / -20^\circ$	304
$(0_1^\circ, \pm 45_1^\circ, 90_1^\circ)_s$	$-45^\circ / 90^\circ$	256
$(0_2^\circ, \pm 45_2^\circ, 90_2^\circ)_s$	$-45^\circ / 90^\circ$	237
$(0_3^\circ, \pm 45_3^\circ, 90_3^\circ)_s$	$-45^\circ / 90^\circ$	213
$(10_2^\circ, 55_2^\circ, -35_2^\circ, 100_2^\circ)_s$	$10^\circ / 55^\circ$	/
	$55^\circ / -35^\circ$	/
	$-35^\circ / 100^\circ$	169
$(90_1^\circ, 0_1^\circ, \pm 30_1^\circ)_s$	$30^\circ / -30^\circ$	294


FIG. 3 – Séquence $(10^\circ, 30^\circ, -10^\circ)_s$ chargée jusqu'à $350MP$; puis découpée suivant une section ; délaminage observé à l'interface $10^\circ/30^\circ$

FIG. 4 – Image d'une séquence $(0_2^\circ, \pm 45_2^\circ, 90_2^\circ)_s$ observée sur la tranche de l'éprouvette ; observation d'un délaminage débutant à l'intersection d'une fissure intralaminare et d'une trame

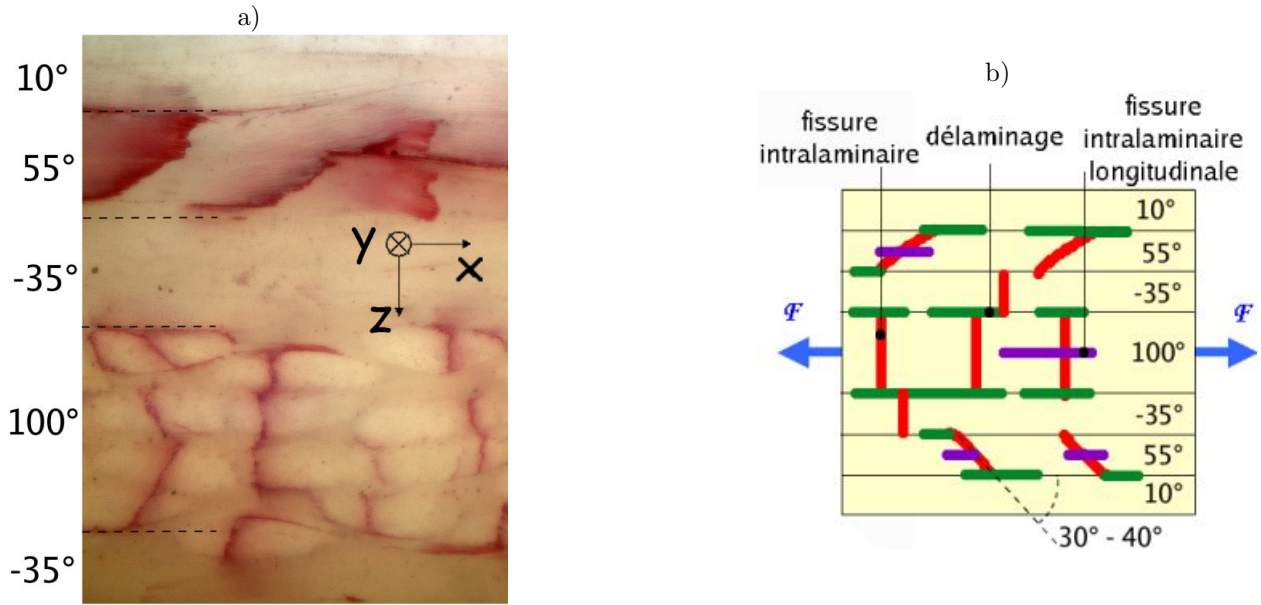


FIG. 5 – a) Photo de la tranche d’une éprouvette de séquence $(10^\circ, 55^\circ, -35^\circ, 100^\circ)_s$ chargée à 350MPa; b) schéma des endommagements visibles sur la tranche

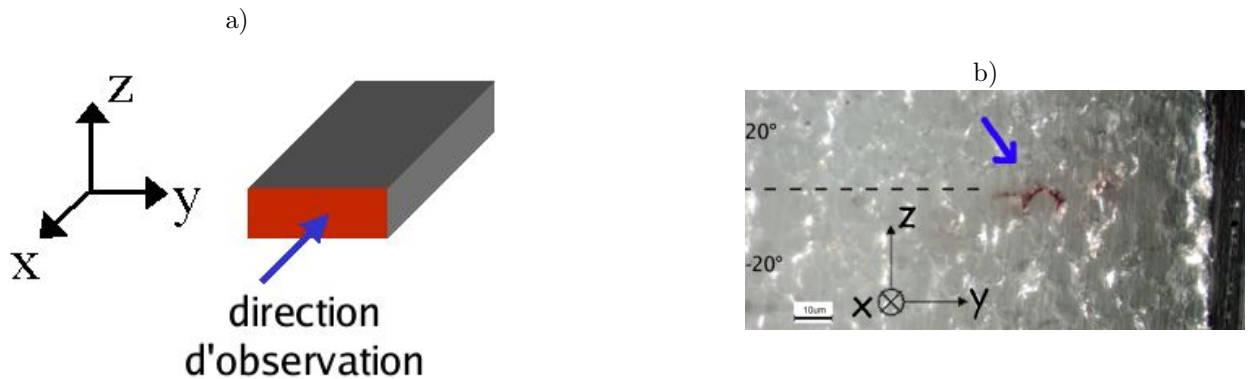


FIG. 6 – Observation du délaminage en profondeur du matériau - observation au microscope optique suivant l’axe x d’une séquence $(0^\circ_3, \pm 20^\circ_3)$ préalablement découpée suivant sa section

Il est tout de même remarquable de constater que la longueur caractéristique identifiée est de l’ordre de grandeur du diamètre d’une fibre (qui est de $11\mu m$), ce qui est relativement cohérent avec les observations précédentes faites au microscope optique (décohésions de quelques fibres observées dans les zones de délaminage).

3.2 Eprouvettes trouées

Les endommagements sont observés sur le bord libre du trou. La direction selon laquelle les observations sont faites est définie par un angle, nommé θ (figure 8). La direction 0° est parallèle à la direction de traction. Pour la séquence $(0^\circ_2, \pm 45^\circ_2, 90^\circ_2)$ (figure 7), de la fissuration intralaminare est observée sur le bord du trou. Dans le pli à 90° , elle s’initie avant la charge macroscopique de $70MPa$; dans les plis à -45° et 45° , la fissuration intralaminare s’initie pour une charge de $85MPa$. Quelques fissures apparaissent également dans les plis à 0° entre $100MPa$ et $115MPa$ de charge. Après une charge de $115MPa$, la fissuration intralaminare s’est développée dans les plis à 90° entre les angles (θ) 65° et 115° . La densité moyenne des fissures mesurée entre les angles 80° et 100° est d’environ de 2 fissure/mm à $2,5 \text{ fissure/mm}$. C’est en bon accord avec les simulations qui prédisent une densité moyenne de 2 fissures/mm dans cette zone. Dans les plis à 45° (resp.

-45°), la fissuration intralaminaires s'est principalement développée entre les angles (θ) 80° et 50° (resp. 100° et 130°). Entre les angles 75° et 50° (resp. 105° et 130°), les fissures présentes dans ces plis ne sont pas perpendiculaires aux plans des plis (autour de l'angle θ égal à 70° , les fissures font un angle d'environ 40° à 60° avec le plan des plis). Dans ces plis, la densité moyenne de fissures mesurée entre les angles 45° et 65° (resp. 115° et 135° dans les plis à -45°) est d'environ de 1 à 1,4 *fissure/mm*. Ici encore, les simulations sont en bon accord avec l'expérience puisqu'elles prévoient une densité moyenne de 1,3 *fissure/mm* dans ces zones.

Pour l'initiation du délaminage, le critère prévoit son initiation à l'interface $-45^\circ/90^\circ$ pour une charge macroscopique de 85MPa , autour de l'angle θ égal à 90° . Entre les angles 100° et 110° de l'interface $0^\circ/45^\circ$, la charge prédite pour le délaminage est également d'environ 85MPa . Les résultats expérimentaux montrent que le délaminage a débuté aux deux interfaces $0^\circ/45^\circ$ et $-45^\circ/90^\circ$, pour une charge de traction de 110MPa à 120MPa .

A l'interface $-45^\circ/90^\circ$, il s'est initié en deux zones : entre les angles 70° à 80° et entre les angles 100° à 115° . Comme pour les éprouvettes non trouées de séquence $(0_2, \pm 45_2, 90_2)$, le délaminage a tendance à débiter en pointe des fissures intralaminaires. Par ailleurs, les trames présentes dans les plis semblent provoquer l'apparition de différents types d'endommagements. Notamment, elles semblent provoquer l'initiation du délaminage en différentes zones des interfaces $0^\circ/45^\circ$ et $-45^\circ/90^\circ$; ou encore, elles provoquent l'apparition de fissures intralaminaires longitudinales dans les plis à 90° . Enfin, à plusieurs reprises, le délaminage s'est initié entre deux pointes de fissures intralaminaires assez proches, toutes deux appartenant à deux plis voisins : l'une de ces fissures est présente dans le pli à 90° , l'autre est présente dans le pli à -45° .

Aux interfaces $0^\circ/45^\circ$, le délaminage s'est initié en deux zones : entre les angles $70^\circ - 80^\circ$ et entre les angles $100^\circ - 110^\circ$. Entre 100° et 110° , l'initiation du délaminage ne semble pas causée par d'autres endommagements. Pour ce délaminage, les comparaisons entre les observations expérimentales et les prédictions de simulations sont relativement correctes. Pour les autres délaminages détectés aux interfaces $0^\circ/45^\circ$, les prédictions s'éloignent des résultats expérimentaux. Toutefois, ces derniers sont principalement causés par deux phénomènes : le premier est l'apparition de fissures dans les plis à 0° ; le second est la présence de fissures non perpendiculaires aux plans des plis dans les plis à 45° . Comme pour les éprouvettes non trouées de séquences $(10_2, 55_2, -35_2, 100_2)$, ce type de fissures peut aisément se transformer en délaminage ou en fissure intralaminaires longitudinales. Cependant, le modèle d'endommagement ne modélise pas des fissures réelles, seulement des chutes de rigidités des plis. Ainsi, ce modèle ne peut pas prendre correctement en compte les interactions entre une fissure, sa géométrie et l'initiation du délaminage. Il est alors clair que le critère ne pourra correctement prédire les cas de délaminage s'initiant entre les angles 70° et 80° aux interfaces $0^\circ/45^\circ$.

Pour la séquence $(0_2, \pm 20_2)$ (figure 8), le critère a prédit une charge de 89MPa pour l'initiation du délaminage, à l'interface $20^\circ / -20^\circ$, au voisinage de l'angle 90° . Expérimentalement, le délaminage est le premier endommagement à apparaître, entre 120MPa et 135MPa . Ensuite, toujours aux mêmes interfaces, d'autres délaminages apparaissent entre 135MPa et 150MPa aux voisinages des angles 80° et 100° . Pour ces derniers, le critère prévoit leurs apparitions entre 130MPa et 135MPa de charges. Enfin, quelques fissures intralaminaires apparaissent en pointes des fissures de délaminage. Quelques fissures intralaminaires longitudinales ont également été observées.

Dans l'ensemble, les prévisions du critère sur des éprouvettes trouées ont tendance à sous-estimer la charge macroscopique à laquelle le délaminage s'initie.

CONCLUSIONS

Une méthode innovante a été établie pour observer les endommagements débouchants sur les bords libres. L'observation des endommagements a été faite sur la tranche d'éprouvettes de traction ou sur le bord libre de trous. Un colorant pénétrant a été utilisé dans cette méthode. Pour révéler le colorant contenu dans les endommagements débouchants, les éprouvettes ont été éclairées de côté pour que la lumière diffuse à travers le matériau et vienne éclairer la surface à observer par l'arrière. Cette méthode a été utilisée avec succès pour à la fois détecter l'initiation du délaminage et observer les fissures intralaminaires, tant sur des éprouvettes non trouées que sur des éprouvettes trouées. Les tests ont été réalisés sur de nombreuses séquences : $(0_n, \pm 20_n)_s$, $(0_2, \pm 30_2)_s$, $(10_2, 30_2, -10_2)_s$, $(10_2, 40_2, -20_2)_s$, $(0_n, \pm 45_n, 90_n)_s$, $(10_2, 55_2, -35_2, 100_2)_s$ et $(90_1, 0_1, \pm 30_1)_s$ ($n = 1, 2, 3$). Pour l'instant, seul un matériau semi-transparent a été testé avec cette méthode. Toutefois, nous espérons avoir des résultats comparables sur un matériau composite opaque tel du carbone / époxy en utilisant un pénétrant fluorescent. Les résultats expérimentaux ont été comparés avec des simulations. Le

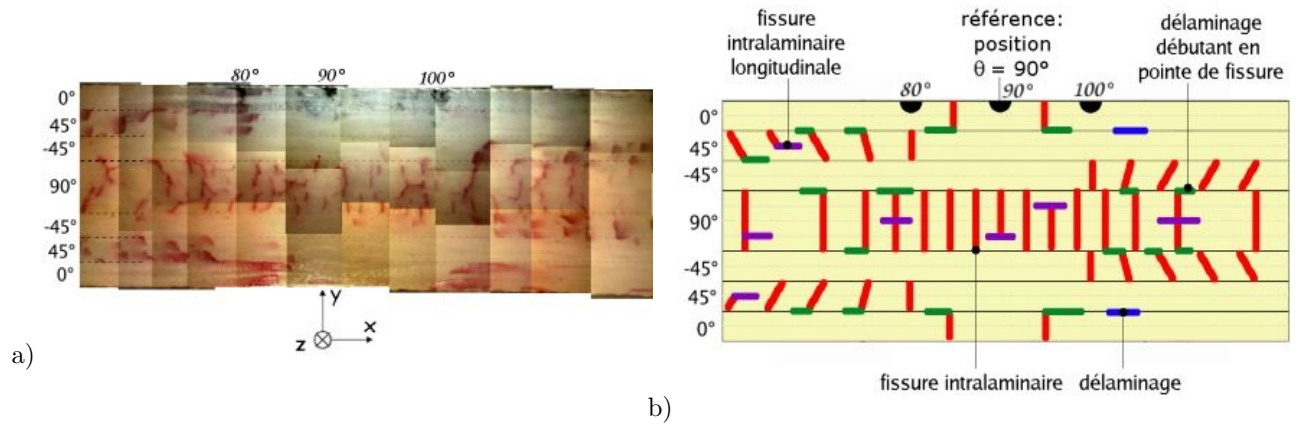


FIG. 7 – Epreuve trouée de séquence $(0_2^\circ, \pm 45_2^\circ, 90_2^\circ)$ chargée jusqu'à 165MPa ; a) images prises sur le bord libre du trou ; b) schéma des endommagements observés sur le bord libre du trou

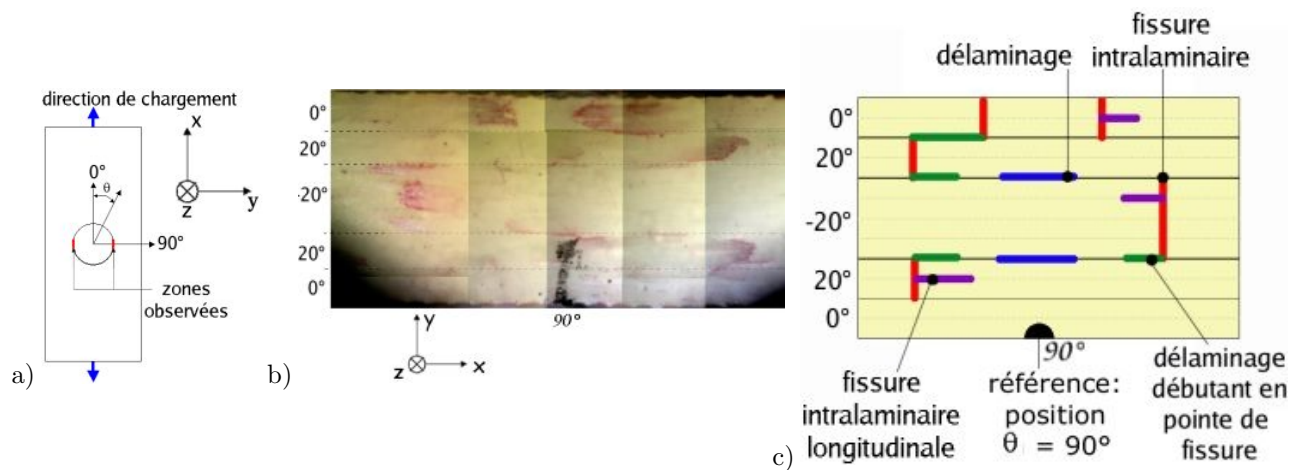


FIG. 8 – Epreuve trouée de séquence $(0_2^\circ, \pm 20_2^\circ)$ chargée jusqu'à 135MPa ; a) la direction selon laquelle les observations sont faites est définie par un angle, nommé θ ; b) images prises sur le bord libre du trou ; c) schéma des endommagements observés sur le bord libre du trou

stratifié a été modélisé avec un comportement élastique couplé à de l'endommagement intralaminare et un critère en contrainte, quadratique et non local, a été construit pour prédire l'initiation du délaminage. Pour la modélisation de l'évolution de la fissuration intralaminare, les densités de fissures prédites sont en bon accord avec les observations expérimentales. Pour l'initiation du délaminage, l'interaction qui peut exister avec la présence de fissures intralaminaires semble non négligeable. En effet, le critère donne des prédictions relativement correctes lorsque le délaminage n'est pas induit par un autre endommagement ; mais le critère peut pencher à prédire l'initiation du délaminage lorsqu'il débute en pointe d'une fissure intralaminare. Le modèle d'endommagement intralaminare ne décrit pas de fissures réelles, juste des chutes de rigidités du pli à une échelle mésoscopique. Il ne peut donc pas rendre compte des champs locaux en pointe d'une fissure intralaminare qui peuvent être la cause du délaminage. Par ailleurs, les observations effectuées laissent penser que la présence des trames dans le pli de base peut également jouer un rôle non négligeable dans les endommagements. Ainsi, pour améliorer la prédiction de l'initiation du délaminage, l'interaction avec les champs de contraintes en pointe de fissures intralaminaires et l'influence des trames sur l'initiation du délaminage doivent être étudiés.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été suivie par le CETIM de Nantes. Les auteurs souhaitent remercier Bretagne Composite pour avoir fourni le matériau. Un grand merci est également attribué aux techniciens du Centre des Matériaux pour toute l'aide apportée à la partie expérimentale.

REFERENCES

1. **Brewer, J.C.** et **Lagace, P.A.**, "Quadratic stress criterion for initiation of delamination", *Journal of Composites Materials*, **22**(1998), 1141-1155.
2. **Marion, G.** "Etude expérimentale et théorique de l'amorçage du délaminage au bord de matériaux composites stratifiés" *PhD Thesis, Université Bordeaux I, France*, (2000).
3. **Lecuyer, F.** et **Engret, D.** , "A methodology for the identification of a criterion for delamination initiation", *Annales des JNC*, **8** (1992).
4. **Leguillon, D.**, **Marion, G.**, **Harry, R.** et **Lecuyer, F.**, "The onset of delamination at stress free edges in angles-ply laminates - analysis of two criteria", *Compos. Sci. Technol.*, **61**, 377-82 (2001).
5. **Lorriot, Th.**, **Marion G.**, **Harry, R.** et **Wagnier, H.** , "Onset of free-edge delamination in composite laminates under tensile loading", *Composites Part B : Engineering*, **34** , 459-471 (2003).
6. **Kim, R.Y** et **Soni, S.R.**, "Experimental et analytical studies on the onset of delamination in laminated composites", *Journal of Composites Materials*, **18** , 71-80 (1984).
7. **Duplessis Kergomard, Y.** *PhD Thesis, Ecole des Mines de Paris, France*, (in press, 2006).
8. **Thionnet, A.** et **Renard, J.** , "Modelling unilateral damage effect in strongly anisotropic materials by the introduction of loading mode in damage mechanics", *International Journal of Solids and Structures*, **36** , 4269-4287 (1999).